

6

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS



Objetivo

● Describir las características de las líneas de transmisión y su efecto sobre las ondas de radio que se propagan través de ellas.

Manual de clases

Última modificación:
30 de agosto de 2022

Tema 6 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.

1.- CONCEPTOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Qué es una línea de transmisión?

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- **Es el medio físico** que transporta la **energía electromagnética** desde el generador hasta la carga.
- **En los sistemas** de radiofrecuencias (RF), las líneas de transmisión están formadas por conductores metálicos con una disposición geométrica determinada para **transportar** la energía.
- **Tipos de líneas de transmisión**
 - ▶ **Línea de pares.** Formada por **dos conductores paralelos**. Sus diversas variantes se utilizan en telefonía y transmisión de datos y para conectar generadores y antenas en las frecuencias de 300 kHz a 30 MHz (Bandas MF y HF).
 - ▶ **Coaxial.** Formada por **dos conductores concéntricos** separados por un dieléctrico sólido. Se utilizan en sistemas de banda ancha como telefonía multicanal, televisión y RF hasta frecuencias del orden de 1 GHz.
 - ▶ **Microcinta.** Construida en una tarjeta de circuitos impresos, con **dos conductores**, uno en un lado de la tarjeta y el otro el plano de Tierra. Se utilizan en sistemas de microondas.
 - ▶ **Guía de ondas.** Constituida por **un conductor**; un tubo hueco de sección rectangular, circular o elíptica. Se utilizan en sistemas de microondas, como alternativa al coaxial.
- **Tipos de líneas según la conexión**
 - ▶ **Línea balanceada.** Los voltajes de los conductores son simétricos respecto a tierra. Por ejemplo: **líneas de pares**.
 - ▶ **Línea no balanceada.** Uno de los conductores está conectado a tierra, por donde retorna la corriente. Por ejemplo: **coaxial** y **microcinta**.



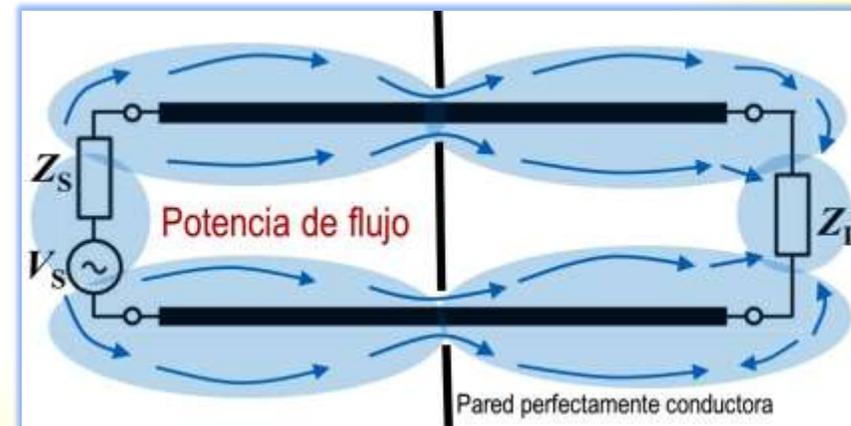
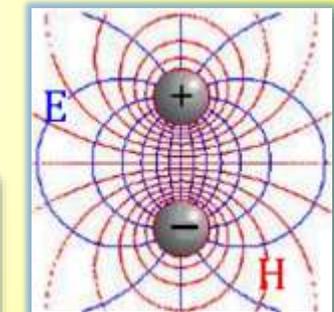
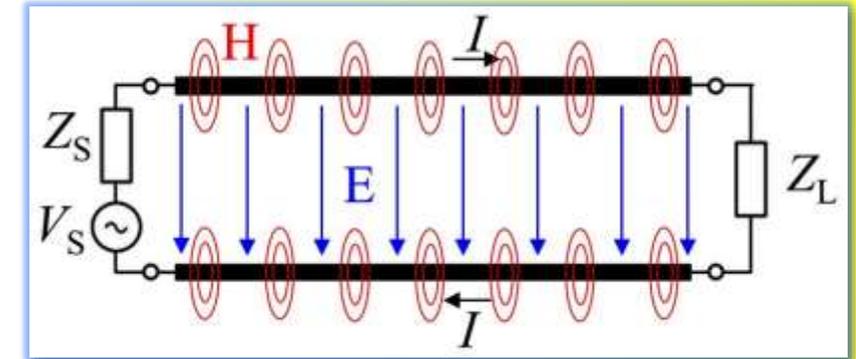
Conceptos de líneas de transmisión

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cómo se transporta la energía en la línea?

(Kraus, 2000) (Blake, 2004)

- Una **aplicación** de las líneas es el **transporte de energía** electromagnética desde el generador hasta a la carga.
- Si se aplica un **voltaje** (V_S) a una línea de pares, se genera un **campo E** entre los conductores, ya que acumulan cargas opuestas. La dirección del campo se invierte en cada semiciclo del voltaje.
- El **voltaje** (V_S) hace fluir una **corriente eléctrica I** por los conductores de la línea terminada en una **impedancia de carga** (Z_L). Esta corriente genera, a su vez, un **campo H** alrededor de los conductores. La dirección de la corriente y de los campos se invierte en cada semiciclo del voltaje.
- La **energía**, entonces, se propaga en forma de **campos E** y **campos H** transversales entre sí y, a su vez, transversales a la dirección de propagación. Este modo de propagación se denomina **modo TEM**.
- Se puede **interpretar**, por tanto, que la energía se propaga alrededor de los conductores de la línea; los conductores solo sirven de guía, razón por la cual a las líneas de transmisión se las llama también **guía de ondas**.



Conceptos de líneas de transmisión

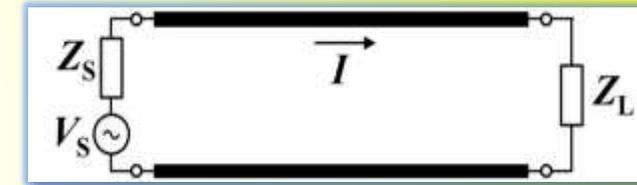
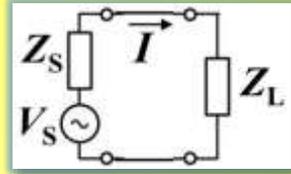
PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Circuitos y líneas: una comparación

(Kraus, 2000)

► 1. Dimensión eléctrica

- **Circuitos.** En **bajas frecuencias**, hasta 30 kHz, el circuito tiene dimensiones pequeñas comparadas con la longitud de onda, por lo que la corriente que circula por un cable conductor en un instante dado, tiene la misma amplitud y fase en todos los puntos del cable, por lo que no tiene ninguna incidencia en el circuito.
- **Líneas.** En **altas frecuencias**, muy por encima de 30 kHz, el circuito tiene dimensiones comparables con la longitud de onda, por lo que la corriente que circula por un cable en un instante dado, no tiene la misma amplitud ni fase en otros puntos del cable, es decir incide en el rendimiento del circuito.



► 2. Análisis circuital

- **Circuitos.** En **bajas frecuencias**, hasta 30 kHz, el circuito se analiza con la **teoría de circuitos**, donde se usan conceptos como voltajes, corrientes y **parámetros concentrados**.
- **Líneas.** En **altas frecuencias**, muy por encima de 30 kHz, el circuito se considera **línea con parámetros distribuidos**, y su análisis requiere de la **teoría de líneas**, derivada de la teoría del campo electromagnético.

► 3. Parámetros concentrados y distribuidos

- **Circuitos.** En **bajas frecuencias**, hasta 30 kHz, los **parámetros concentrados** son: resistencia, conductancia, inductancia y capacitancia. Están concentrados en un solo elemento o componente bien localizado físicamente.
- **Líneas.** En **altas frecuencias**, muy por encima de 30 kHz, la resistencia, conductancia inductancia o capacitancia no están concentradas en un punto de la línea, sino **distribuidas** uniformemente a lo largo de ella. A pesar de ello, la **teoría de líneas** permite aprovechar muchas de las leyes y propiedades que se estudian en electrónica de baja frecuencia.

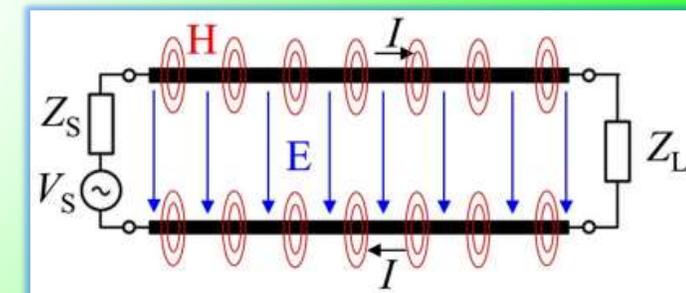
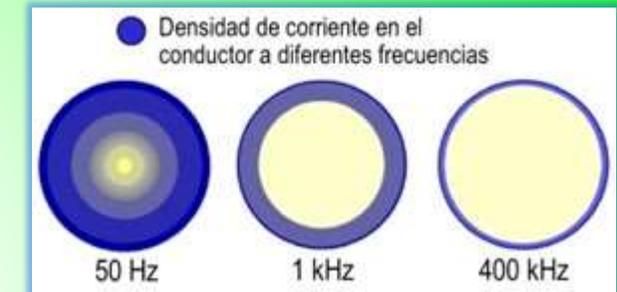
2. TEORÍA DE LÍNEAS

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Parámetros distribuidos de la línea de transmisión

(Anguera, 2008) (Blake, 2004)

- ► **Resistencia distribuida R** . Es la resistencia en serie por unidad de longitud (Ω/m). Depende de la resistividad de los conductores y de la frecuencia. En **altas frecuencias**, la resistencia aumenta debido al **efecto skin**, que es la tendencia de la corriente a acumularse en la capa superficial del conductor, produciendo atenuación en la onda.
- ► **Conductancia distribuida C** . Es la conductancia en paralelo por unidad de longitud (S/m). El dieléctrico no es perfecto y tiene resistividad finita, por lo que parte de la corriente se “fuga” entre los conductores, contribuyendo a la atenuación en la onda. A bajas frecuencias éstas pérdidas son tan pequeñas que se ignoran; sin embargo, son significativas a medida que **aumenta la frecuencia**.
- ► **Inductancia distribuida L** . Es la inductancia en serie por unidad de longitud (Hy/m). El flujo de corriente en los conductores genera un campo H alrededor de ellos, lo cual se modela como un **inductor en serie** que almacena dicha energía magnética. Cuando **aumenta la frecuencia**, la inductancia comienza a tener efecto, porque mayor será la reactancia inductiva en serie.
- ► **Capacitancia distribuida C** . Es la Capacitancia en paralelo por unidad de longitud (F/m). El voltaje entre los conductores genera un campo E entre ellos, lo cual se modela como un **capacitor en paralelo** que almacena dicha energía eléctrica. Cuando **aumenta la frecuencia**, la capacitancia comienza a tener efecto, porque menor será la reactancia capacitiva en paralelo.



Modelo circuital de la línea de dos conductores

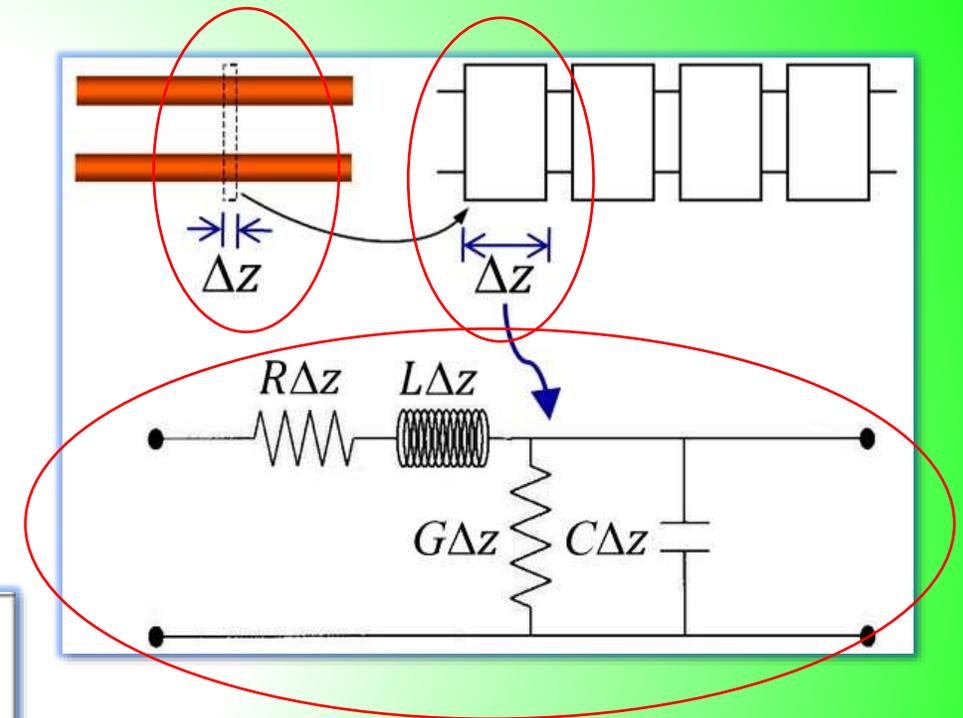
- El **comportamiento** de la línea a **altas frecuencias** se analiza con la teoría de líneas y con una extensión de la teoría de circuitos que implica **parámetros distribuidos**. Para ello, se la divide en secciones de longitud infinitesimal Δz .
- El **modelo** considera las **pérdidas** y el **almacenamiento** de energía en cada una de estas secciones. Un modelo adecuado es una red de cuadripolos, donde **R**, **G**, **L**, y **C** son los parámetros distribuidos de la línea.
- Este **elemento infinitesimal** se supone tan pequeño que los parámetros del circuito pueden considerarse **concentrados**.

► Cálculo de parámetros distribuidos.

Los parámetros distribuidos de las líneas dependen del grosor de los conductores, su separación y de la permitividad del dieléctrico que los separa.

- ☒ Se han desarrollado fórmulas para calcularlos, las cuales se resumen en tablas.

$C \text{ (F/m)}$	$\frac{2 \pi \epsilon}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi \epsilon}{\ln(d/a)}$	$\frac{\epsilon b}{a}$
$L \text{ (Hy/m)}$	$\frac{\mu}{2 \pi} \ln(b/a)$	$\frac{\mu}{\pi} \ln(d/a)$	$\frac{\mu a}{b}$
$G \text{ } (\Omega \text{ m})^{-1}$	$\frac{2 \pi \sigma_{eq}}{\ln(b/a)}$	$\frac{2 \pi \sigma_{eq}}{\ln(d/a)}$	$\frac{\sigma_{eq} b}{a}$
$R \text{ } (\Omega / \text{m})$	$\frac{R_s}{2 \pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	$\frac{2 R_s}{b}$
$Z_0 \text{ } (\Omega)$	$\frac{\eta}{2 \pi} \ln(b/a)$	$\frac{\eta}{\pi} \ln(d/a)$	$\frac{\eta a}{b}$



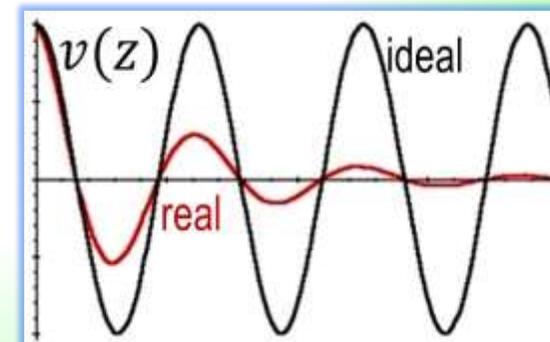
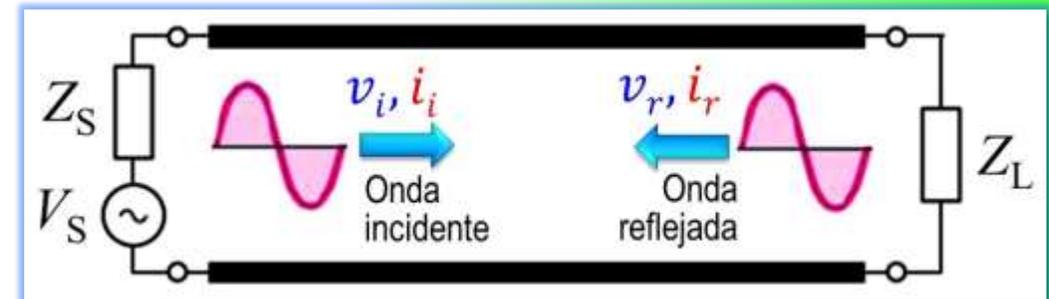
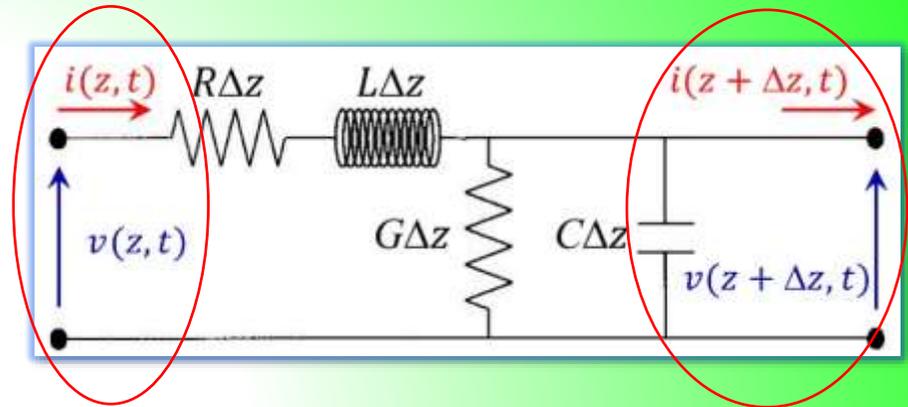
Teoría de líneas

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Análisis del modelo circuital de la línea

(Kraus, 2000)

- **Análisis del cuadripolo.** El análisis considera una variación senoidal del voltaje y la corriente expresados en notación fasorial, y la aplicación de las leyes de Kirchoff al cuadripolo.
- **Resultado del análisis.** El análisis genera ecuaciones diferenciales cuyas soluciones son:
 - Solución 1. Ecuaciones de onda** para el voltaje y la corriente en la línea, interpretándose como una superposición de dos ondas: una **incidente** que viaja del generador hacia la carga y otra **reflejada** que viaja en sentido contrario, tanto para el voltaje como para la corriente. Estas ecuaciones son conocidas como **Ecuaciones de Helmholtz**.
 - Solución 2. Constante de propagación**, que expresa que la onda de voltaje, o corriente, se **atenúa exponencialmente** conforme se propaga a lo largo de la línea.



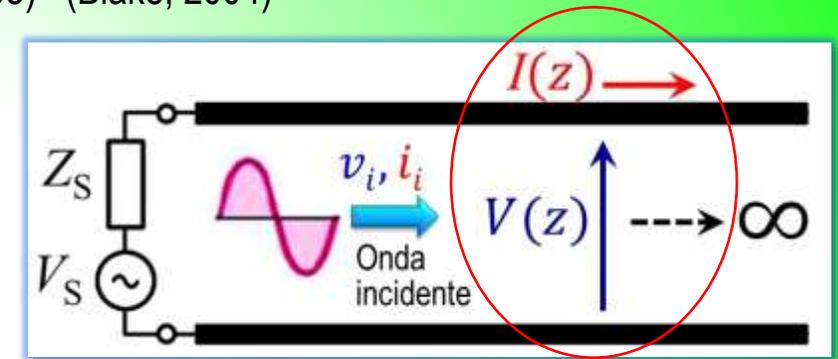
Teoría de líneas

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Concepto de impedancia característica de la línea

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- **De acuerdo** con las Ecuaciones de onda, una onda incidente y otra reflejada se superponen a lo largo de la línea. Sin embargo, en una línea hipotéticamente **infinita**, la **onda incidente** viaja a lo largo de ella por siempre, y nunca se refleja.
- **En ausencia de ondas reflejadas**, si las **ondas incidentes** de voltaje y de corriente se vinculan entre sí, en cualquier punto de la línea, se obtiene la **impedancia característica**, parámetro con dimensiones de resistencia que caracteriza a la línea.
- La **impedancia característica** depende de los **parámetros distribuidos** de la línea y la **frecuencia**. Es compleja, contiene elementos reactivos, lo que señala un desfase entre las ondas de voltaje y de corriente.
- **En la práctica**, se usan líneas de **bajas pérdidas**, y si la frecuencia es suficientemente alta, la **potencia de pérdidas** se ignora, pues es mucho menor que la **potencia almacenada** en el campo electromagnético que se propaga como una onda en la línea.
- **En tales condiciones**, la **impedancia característica** es real, puramente resistiva, y no depende de la frecuencia, únicamente de la **inductancia** y **capacitancia**. En tales condiciones, se la conoce como el modelo de **alta frecuencia** de la línea.



$$Z_0 = \frac{V(z)}{I(z)} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Z_0 = impedancia característica, en Ω .
 V, I = voltaje y corriente en un punto.
 R, G, L, C = parámetros distribuidos.
 $\omega = 2\pi f$ = frecuencia angular, en **rad**.

$$R \ll \omega L \quad G \ll \omega C$$



$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ejemplos para calcular la impedancia característica de la línea

- **Ejemplo 1. Línea telefónica.** Una línea telefónica de uso en interiores, tiene 2 conductores paralelos de cobre de 0.60 mm de diámetro. La separación entre ellos es de 2.5 mm y el aislante entre ambos es polietileno con permitividad 2,26. Calcule la **impedancia característica** del cable suponiendo su utilización a altas frecuencias. Utilice la fórmula de tablas.
- **Ejemplo 2. Cable coaxial.** Un cable coaxial usado en sistemas VHF, UHF y microondas, tiene conductores de cobre aislados entre sí con polietileno de permitividad 2,26. El diámetro del conductor interno es de 3 mm y del externo 9,6 mm. Calcule la impedancia característica del cable.

- **Valores de impedancia.** En la práctica, no es necesario calcular la **impedancia característica**, puesto que es parte de las especificaciones de un cable, lo cual simplifica los criterios de acoplamiento.
- **¿Qué es el acoplamiento?**

Aplicación	Valor
Coaxial transmisor y receptor de RF	50 Ω
Coaxial televisión por cable	75 Ω
Coaxial red de computadores	93 Ω
Par trenzado UTP	100 Ω
Par trenzado STP	150 Ω
Línea de cinta antena de televisión	300 Ω

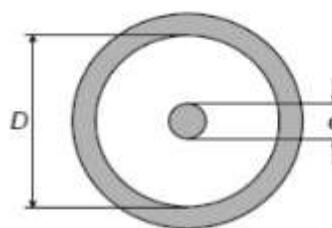
(Blake, 2004)



$$Z_0 \approx \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{2D}{d} \right)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z_0 = 169 \Omega.$$



$$Z_0 \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$Z_0 = 46,5 \Omega.$$

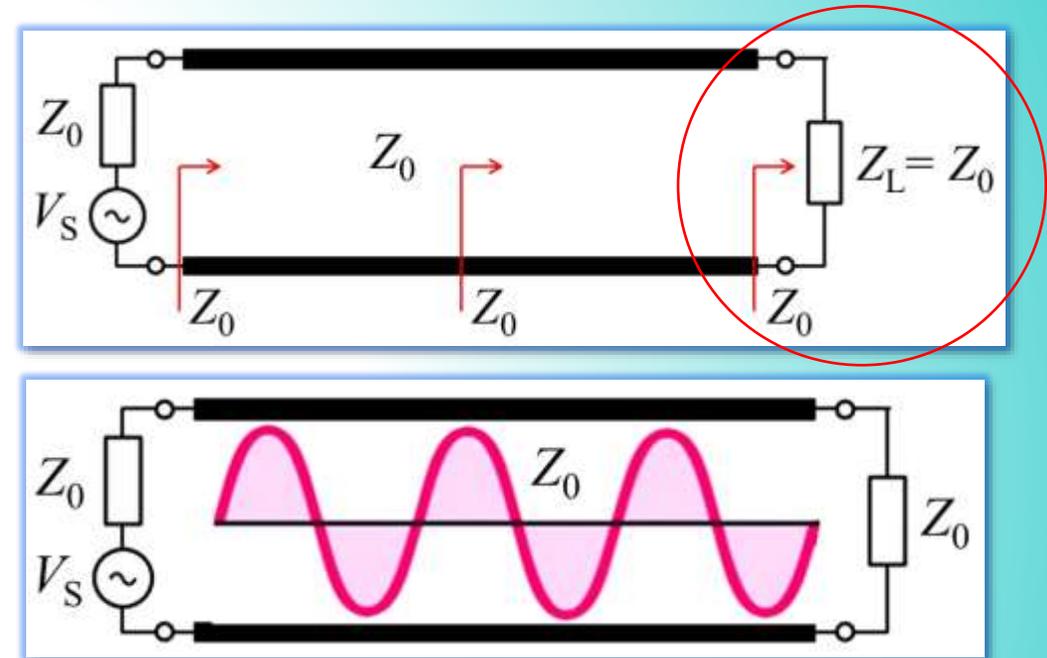
3. PROPAGACIÓN DE ONDA EN LA LÍNEA

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Propagación en línea acoplada

(Blake, 2004)

- **Concepto de línea acoplada.** Para no tratar con una línea infinita, producto de la imaginación, se utiliza una de longitud finita terminada con una impedancia de carga igual a la impedancia característica.
- **El efecto visto** desde el generador es que la **onda incidente** viaja hasta la carga donde es **absorbida** totalmente y no se refleja.
- **Una línea de longitud finita** que se termina en su impedancia característica se llama **línea acoplada**; no produce onda reflejada.



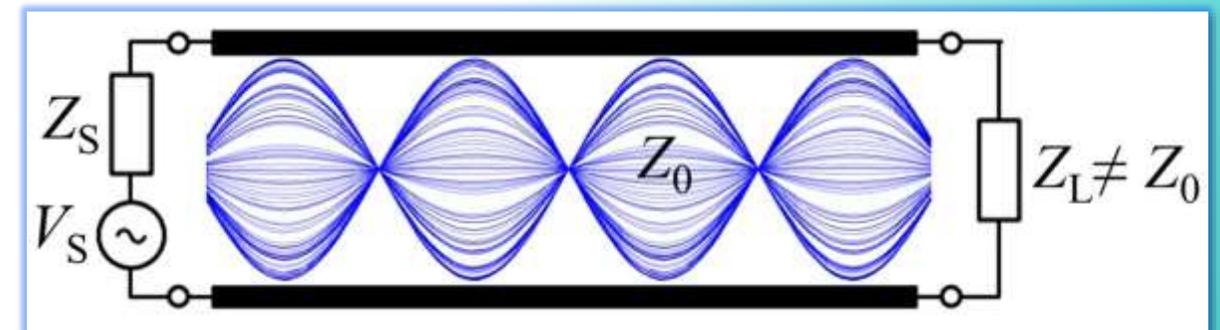
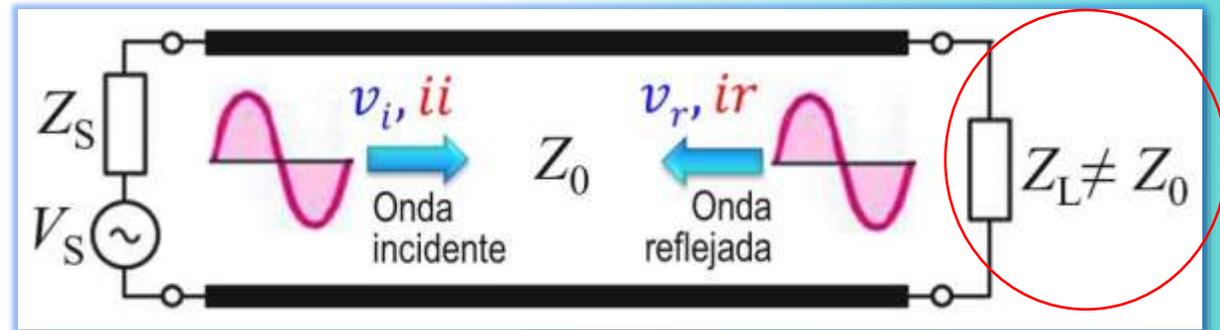
Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Propagación en línea no acoplada

(Blake, 2004)

- **Concepto de línea no acoplada.** Si la onda viaja en un medio e incide sobre la frontera de un segundo medio de diferentes características, parte de su energía se transmite hacia el segundo medio y otra se **refleja** hacia el primero.
- **Un proceso análogo** ocurre en la línea terminada en una impedancia de carga que **no es igual** a su impedancia característica; el primer medio sería la propia línea y el segundo la **impedancia de carga**.
- **En consecuencia**, parte de la energía incidente es absorbida en la carga y otra se refleja hacia el generador. A esta línea que produce **onda reflejada** se llama **línea no acoplada**.
- **La onda reflejada** se agrega a la incidente y la suma de ambas se conoce como **onda estacionaria**, la cual queda confinada dentro de la línea.



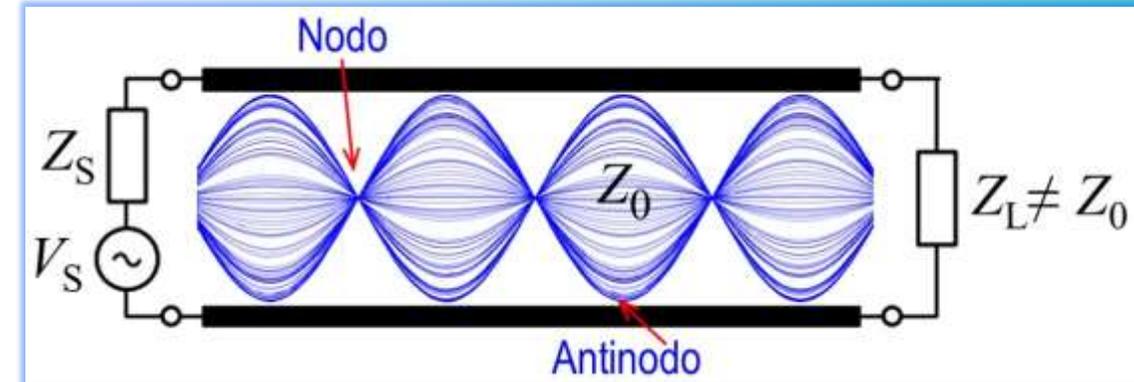
Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Qué es la onda estacionaria?

(Blake, 2004)

- **Es la suma de las ondas** incidente y reflejada en una línea no acoplada. La interacción entre estas ondas causa lo que parece ser un patrón estacionario de ondas en la línea. Debido a su apariencia, a estas ondas se las conoce como **ondas estacionarias**.
- **En cada punto** de la línea los valores instantáneos del voltaje incidente y reflejado se suman en forma algebraica para obtener el voltaje total.
 - **▶ Nodos.** Hay puntos de la onda que son siempre **cero**, **no vibran**, esos puntos se denominan **nodos**, y son la causa de que la energía en lugar de transmitirse se almacene entre cada nodo. La distancia que separa dos nodos consecutivos es $\lambda/2$.
 - **▶ Antinodos.** Hay otros puntos que **vibran** en el tiempo con una amplitud de vibración máxima, igual al doble de las ondas que se interfieren, y con una energía máxima, estos puntos se denominan **antinodos**.
- **Advertencia.** La **onda estacionaria** que se forma en la línea no acoplada es energía que no se transmite y que puede calentar y dañar dispositivos electrónicos. Es necesario **controlar** la porción de onda que se refleja.



Propagación de onda en la línea

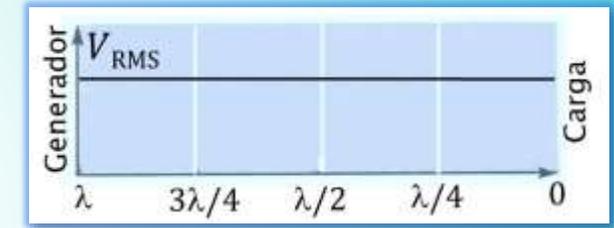
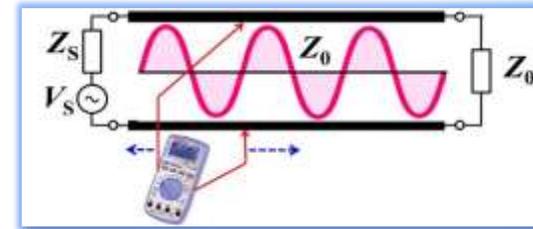
PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cómo varía el voltaje a lo largo de la línea?

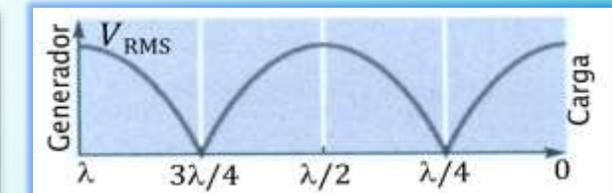
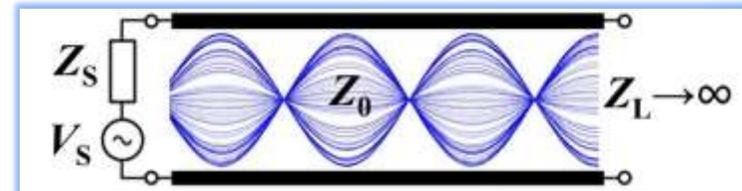
(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- Si se mueve un **voltímetro** desde el generador hasta la carga, se obtiene la variación del voltaje efectivo (RMS) a lo largo de la línea. Se hará el análisis en líneas con terminaciones extremas.

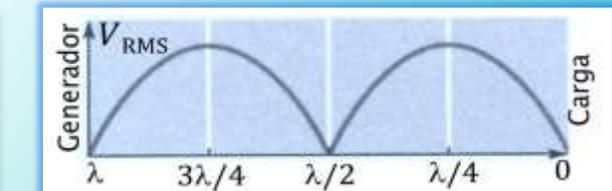
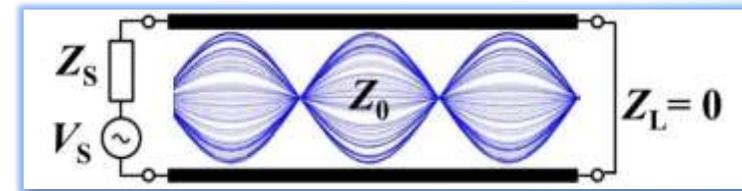
- **▶ 1. En línea acoplada.** El voltaje incidente es absorbido por la carga. Se obtiene una onda plana.



- **▶ 2. En circuito abierto.** No hay carga que absorba al voltaje incidente, por lo que se **refleja** con la misma amplitud y polaridad y se suma al nuevo incidente, produciendo un voltaje efectivo máximo.



- **▶ 3. En corto circuito.** No hay carga que absorba al voltaje incidente, por lo que se **refleja** con la misma amplitud y polaridad opuesta y se suma al nuevo incidente, produciendo un voltaje cero.



- **La corriente responde** al contrario que el voltaje.

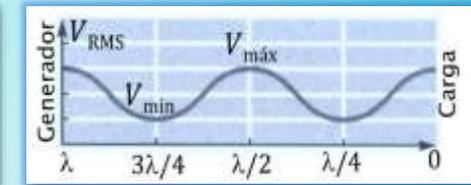
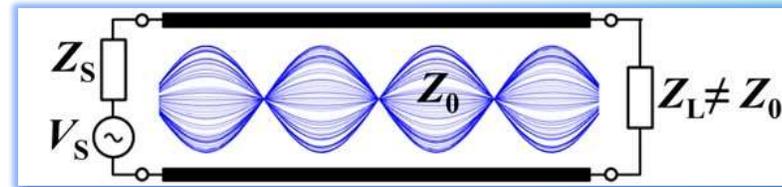
Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cómo varía el voltaje a lo largo de la línea? (cont.)

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- ▶ **4. En línea con carga no extrema.** Si la línea está **desacoplada**, no en extremo, parte del voltaje es absorbido en la carga y otra se **refleja** hacia el generador. El **voltaje reflejado** tiene una amplitud menor que el incidente, por lo que no habrá lugar sobre la línea donde el voltaje sea 0.



- El **voltaje máximo** ocurre cuando los voltajes incidente y reflejado están en fase, y el **mínimo** cuando tienen fases opuestas.

- ▶ **Parámetros de reflexión.** Se definen dos, los cuales, a través de un análisis circuital en la carga y un poco de álgebra, es posible expresarlos en función de las impedancias características y de la carga.

- ▶ **Coefficiente de reflexión (Γ).** Relación entre el voltaje reflejado y el incidente. En general es un número complejo.

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

- ▶ **Relación de onda estacionaria ROE (SWR).** Relación entre el voltaje **máximo** y el voltaje **mínimo**. La SWR tiene que ver solo con magnitudes, es un número real.

$$SWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}}$$

$$SWR = \frac{Z_L}{Z_0} \quad \text{Si } Z_L > Z_0$$

$$SWR = \frac{Z_0}{Z_L} \quad \text{Si } Z_0 > Z_L$$

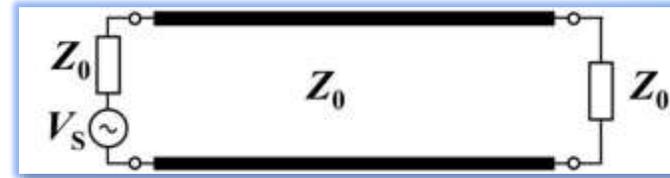
Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Ejemplos de líneas con terminaciones extremas

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

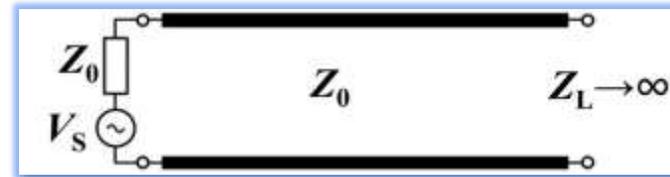
- **Ejemplo 3. Línea acoplada.** Calcule el coeficiente de reflexión y la SWR en una línea acoplada.



$\Gamma = 0$. El voltaje reflejado es 0.

SWR = 1. Los voltajes máximos y mínimos son iguales. Es una onda plana.

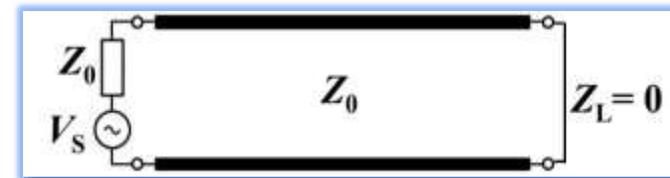
- **Ejemplo 4. Circuito abierto.** Calcule el coeficiente de reflexión y la SWR en una línea terminada en circuito abierto.



$\Gamma = 1$. Los voltajes incidente y reflejado son de igual magnitud y signo.

SWR $\rightarrow \infty$. El voltaje mínimo es 0.

- **Ejemplo 5. Corto circuito.** Calcule el coeficiente de reflexión y la SWR en una línea terminada en corto circuito.



$\Gamma = -1$. Los voltajes incidente y reflejado son de igual magnitud pero de signo opuesto.

SWR $\rightarrow \infty$. El voltaje mínimo es 0.

- **La SWR** toma valores entre **1** (situación ideal de acoplamiento) e **infinito** (falla extrema en la práctica).

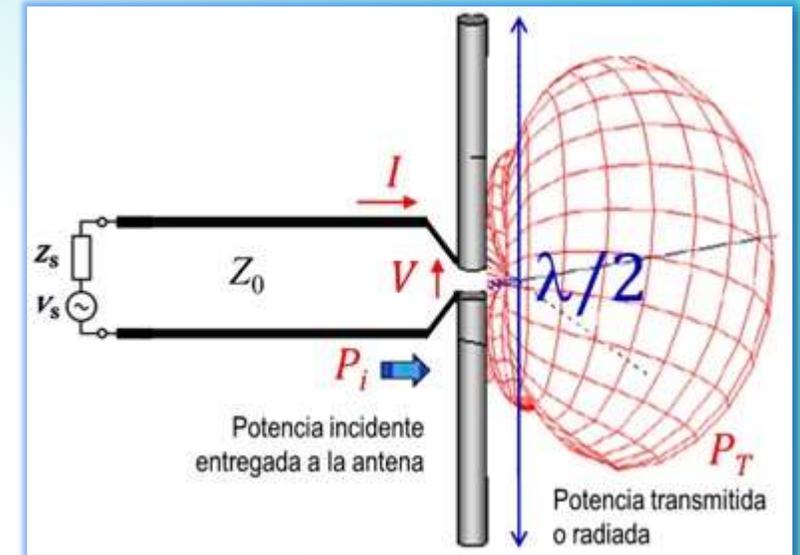
Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

El modelo circuital e la antena

(Blake, 2004)

- La **antena se modela** como una **impedancia compleja**, cuyos elementos son:
 - ► **Impedancia de la antena** (Z_A). Al conectar el transmisor a la antena, la relación de V e I en los terminales de la antena permite modelarla como una impedancia compleja que varía con la frecuencia.
 - ► **Resistencia de radiación** (R_r). Representa la capacidad de disipación de potencia mediante **radiación al espacio**, y que puede ser equiparada a una resistencia óhmica disipadora de potencia. Es decir, la antena se presenta a la línea como una resistencia del espacio (virtual) acoplada a sus terminales.
 - ► **Resistencia de pérdidas** (R_Ω). Representa la potencia disipada en la superficie de los conductores de la antena, aunque se utilizan antenas de bajas pérdidas.
 - ► **Reactancia de la antena** (X_A). Representa la **inductancia** de los conductores de la antena (energía magnética) y su **capacitancia** (energía eléctrica) respecto a tierra. Estas reactancias son responsables en los circuitos AC de pérdidas de potencia en forma de "pérdidas reactivas de potencia", que no disipan calor, pero que están ahí.



$$Z_A = \frac{V}{I} = R_r + R_\Omega + jX_A$$

Z_A = impedancia de la antena, en Ω .

V = voltaje, en V .

I = corriente, en A .

R_r = resistencia de radiación, en Ω

R_Ω = resistencia de pérdidas, en Ω

X_A = reactancia de la antena, en Ω

Propagación de onda en la línea

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

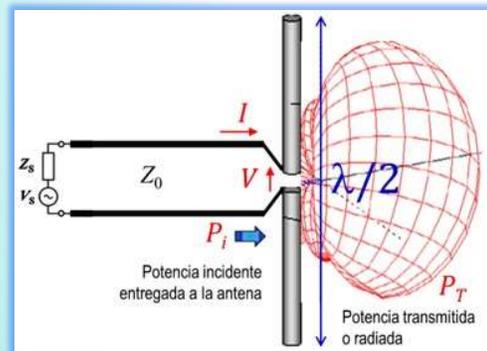
Resistencia de radiación de la antena dipolo

(Blake, 2004)

- **Un dipolo corto** (de una fracción de λ) y de bajas pérdidas, tiene una impedancia compleja, compuesta por una **resistencia de radiación** de 2Ω y una **reactancia capacitiva** de 1.900Ω .

$$Z_A = 2 - j1.900 \text{ } [\Omega]$$

- **Si la longitud del dipolo** corto aumenta, su **resistencia de radiación** se incrementa y su reactancia capacitiva disminuye.
- **Cuando el dipolo** alcanza $\lambda/2$ de longitud, adquiere una impedancia compuesta por una **resistencia de radiación** de 73Ω y una reactancia, que se vuelve inductiva, de $42,5 \Omega$.



$$Z_A = 73 + j42,5 \text{ } [\Omega]$$

- **Si se disminuye** en un 5% la longitud del dipolo, a $0.95 (\lambda/2)$, la antena se vuelve resonante, es decir, la impedancia se hace completamente resistiva, con una **resistencia de radiación** de 70Ω y una reactancia de 0.

$$Z_A = R_r = 70 \text{ } [\Omega]$$

Z_A = impedancia de la antena, en Ω .
 R_r = resistencia de radiación, en Ω

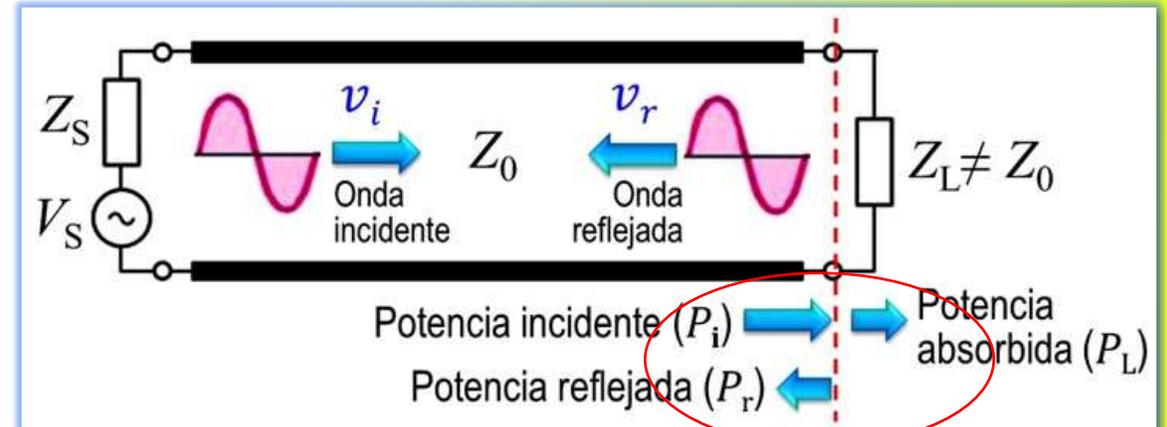
4. MÁXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cuánta potencia se transfiere a la carga?

- Las **reflexiones** causan que la **potencia absorbida** en la carga sea menor de lo que sería con línea acoplada, debido a que parte de la potencia se refleja hacia el generador.
- La **potencia** es proporcional al voltaje al cuadrado por tanto, la fracción de la potencia que se refleja es el **coeficiente de reflexión** al cuadrado.
- La **cantidad** de **potencia absorbida** por la carga es la diferencia entre la potencia incidente y la potencia reflejada.
- La **máxima transferencia** de potencia se produce en línea acoplada.
 - Ejemplo 6. Potencia reflejada y disipada.** Un generador envía 50 mW por una línea de 50 Ω. El generador se acopla con la línea, pero no con la carga. Si el coeficiente de reflexión es 0.5, ¿cuánta potencia se refleja y cuánta se disipa en la carga?
 - Ejemplo 7. Coeficiente de reflexión.** Un transmisor entrega 50 W a una línea sin pérdida de 600 Ω que se termina con una antena que tiene una impedancia de 275 Ω, resistiva. Calcule:
 - El coeficiente de reflexión. Vea la fórmula
 - La potencia que en realidad llega a la antena (potencia radiada).

(Blake, 2004)



$$\Gamma^2 = \left(\frac{V_r}{V_i}\right)^2 = \frac{P_r}{P_i}$$

Γ = coeficiente de reflexión.
 V_r, V_i = voltaje reflejado, incidente, en V .
 P_r, P_i = potencia reflejada, incidente, en W .

$$P_L = P_i - P_r$$

$$P_r = 12,5 \text{ mW}$$
$$P_L = 37,5 \text{ mW}$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\text{a) } \Gamma = -0,3$$
$$\text{b) } P_L = 43,1 \text{ W}$$

Máxima transferencia de potencia

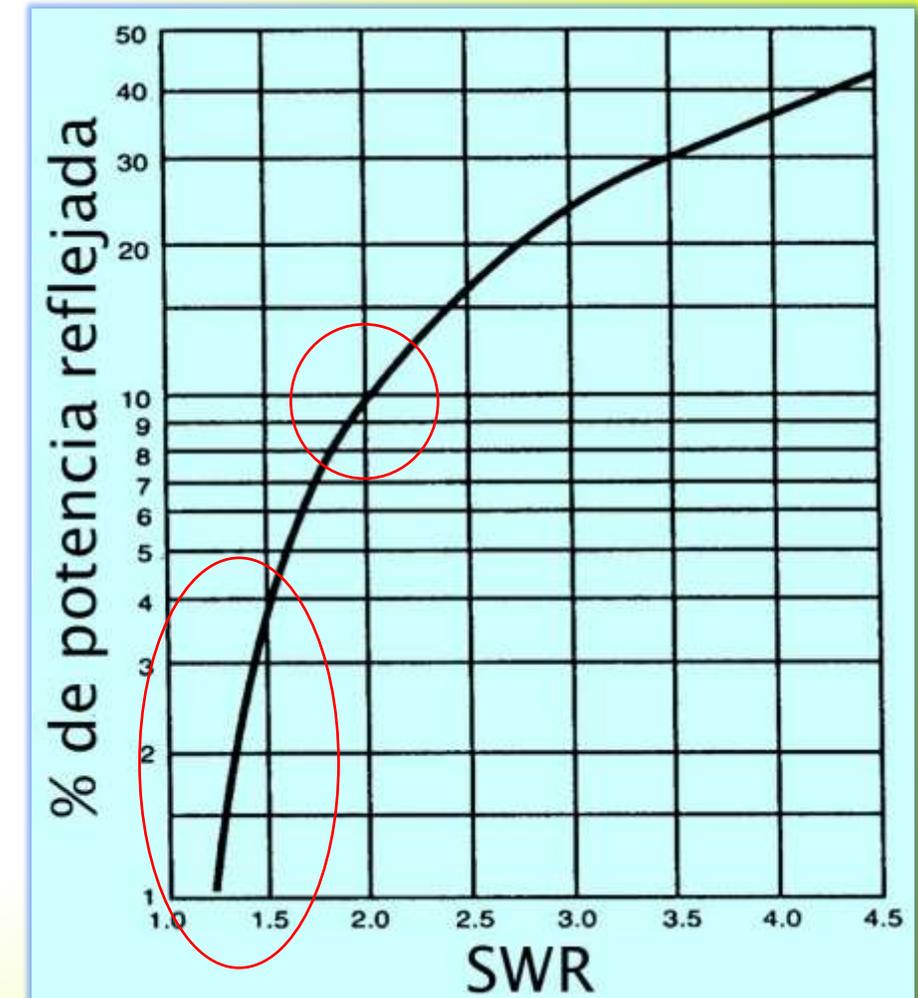
PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Cálculo rápido de la transferencia de potencia

(Frenzel, 2003)

- **Para cálculos rápidos** en mediciones, se usa una curva que muestra la relación entre el porcentaje de energía reflejada y la SWR.
- **Para SWR = 1**, el porcentaje de energía reflejada es 0. **Para SWR = 1.5** es de casi 4%, esto no es problema, ya que el 96% de la energía va a la carga.
- **Para SWR ≤ 2**, el porcentaje es menor que 10%, lo que significa que el 90% llega a la carga. Para la mayor parte de las aplicaciones esto es aceptable.
- **Para SWR > 2**, el porcentaje aumenta de manera espectacular, y deben tomarse medidas para **reducir la SWR** con el fin de prevenir un daño potencial. Algunos sistemas de estado sólido, cortan en forma automática cuando la SWR sube a más de 2.
- **La solución más común** para reducir la SWR es añadir una **red de acoplamiento** para producir un acoplamiento correcto.
 - **Ejemplo 8. Potencia reflejada vs. SWR.** Un transmisor suministra 50 W a una carga a través de una línea con una **SWR de 2:1**. Determine la potencia absorbida por la carga. Utilice la gráfica de % de potencia reflejada versus SWR.

$$P_L = 44,4 \text{ W}$$



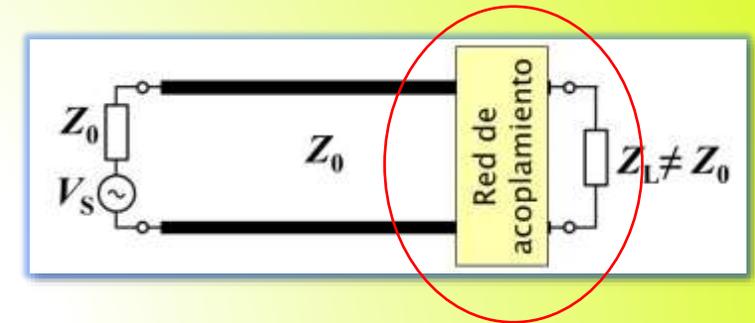
5. ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIA

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

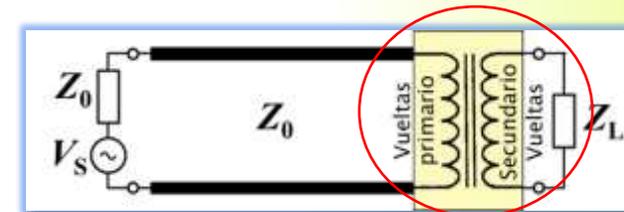
¿Cómo se puede acoplar la carga a la línea?

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

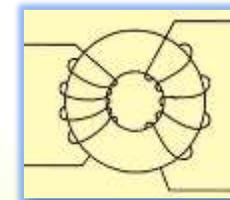
- **Las reflexiones** causan que la **potencia absorbida** en la carga sea menor de lo que sería con línea acoplada, debido a que parte de la potencia se **refleja** hacia el generador.
- **Se obtienen mejores** resultados si la carga está acoplada con la impedancia característica; si ese no es el caso, se conecta una **red de acoplamiento** para corregir el desacoplamiento. **Se pueden presentar dos situaciones.**



- ► **1. Cuando la carga es resistiva.** Existen dos tipos de redes de acoplamiento: el **transformador** y la **línea de $\lambda/4$** .



$$\frac{Z_0}{Z_L} = \left(\frac{\text{Vueltas Primario}}{\text{Vueltas Secundario}} \right)^2$$



$$\text{Vueltas Primario/Vueltas Secundario} = 0.752$$

- **Ejemplo 9.** Acoplamiento con transformador. Por lo común, los transformadores de RF son **toroidales**, con núcleo de ferrita o de hierro pulverizado. Encuentre la **relación de transformación** correcta de un transformador requerido para acoplar una línea de 50Ω con una impedancia de carga de 88.38Ω , resistiva.

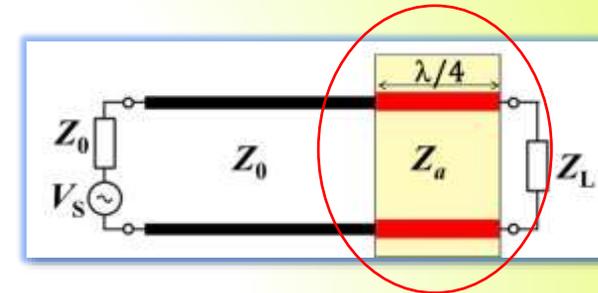
Acoplamiento de impedancia

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cómo se puede acoplar la carga a la línea? (cont.)

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- ▶ **1. Cuando la carga es resistiva.** (cont.)
 - **La línea de $\lambda/4$.** Logra que la impedancia de **carga resistiva** se parezca a la característica, al seleccionar el valor correcto de su impedancia característica.
 - **Ejemplo 10.** Acoplamiento con línea de $\lambda/4$. Encuentre la impedancia característica de una **línea de $\lambda/4$** requerida para acoplar una línea de 50Ω con una impedancia de carga de 88.38Ω , resistiva.



$$Z_a = \sqrt{Z_0 Z_L}$$

$$Z_a = 66,48 \Omega.$$

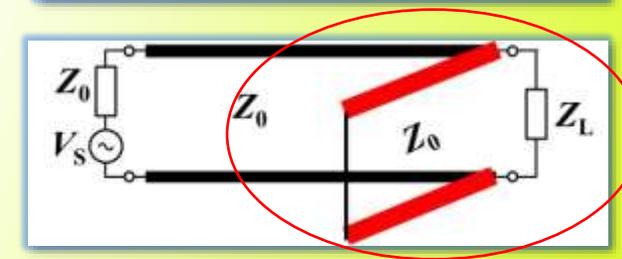
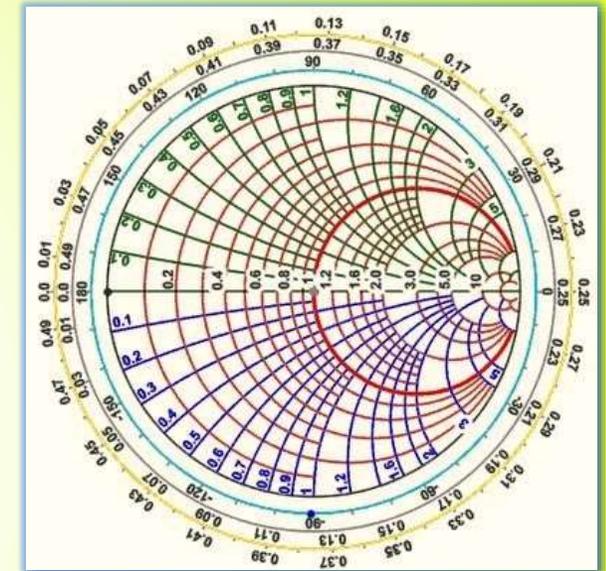
Acoplamiento de impedancia

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

¿Cómo se puede acoplar la carga a la línea? (cont.)

(Frenzel, 2003) (Blake, 2004)

- ▶ **2. Cuando la carga es compleja.** Si la impedancia característica y de carga tienen valores complejos, se utiliza el **diagrama de Smith** (Philip Smith, 1939) como ayuda para diseñar el acoplamiento de impedancias.
 - **Es un diagrama** que permite visualizar **impedancias complejas** y la forma en la que varían a lo largo de la línea.
 - **En la actualidad**, es común hacer cálculos de línea con la ayuda de una PC, pero muchos de los programas utilizan el **diagrama de Smith** para mostrar su resultado.
 - **Existen dos** tipos de redes de acoplamiento: **reactancia en serie** y **reactancia en paralelo**.
 - **Reactancia en serie.** Logra que la parte reactiva de la impedancia de carga se cancele al sumar una **reactancia en serie** opuesta (inductiva o capacitiva).
 - **Reactancia en paralelo.** Logra que la parte reactiva de la impedancia de carga se cancele al colocar un **stub paralelo reactivo** (inductivo o capacitivo) de línea cortocircuitada. Esta solución se aplica en frecuencias superiores a 30 MHz.
 - **Ejemplo 11. Acoplamiento con reactancia en serie.** Utilice un capacitor o inductor **en serie** para acoplar una línea de 50Ω con una impedancia de carga de $50 + j75 \Omega$, a una frecuencia de 100 MHz.
 - **El balun** es un acoplador de línea balanceada a no balanceada.



Una reactancia capacitiva de $-j75 \Omega$, es decir, un capacitor de $C = 21.2 \text{ pF}$.

Referencias bibliográficas

PARÁMETROS CIRCUITALES DE LAS ANTENAS

Referencias bibliográficas

- APC, Asociación para el progreso de las comunicaciones (2007). *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. Mountain View, CA. USA: Limehouse Book Sprint Team.
- Blake, Roy (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. México: Thomson.
- Frenzel (2003). *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*. Madrid: Alfaomega.
- Forouzan, B. A. (2020). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- Kraus, J., & Fleisch, D. (2000). *Electromagnetismo con Aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
- RadioMobile. *RadioMobile*. Recuperado el 16 de marzo de 2020, de <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- Stallings, William (2007). *Data and Computer Communication*. New Jersey: Pearson.

FIN

Tema 6 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.